



**Workshop « modèles et systèmes complexes, le changement climatique global »  
LaLonde Les Maures -14-20septembre 2003**

**Présentation de deux modèles emblématiques de l'analyse des politiques  
économiques du changement climatique : MARKAL et DICE**

Pierre Matarasso-CIRED

**1-Introduction : historique de MARKAL et DICE**

Ce qui rend l'analyse des modèles MARKAL et DICE intéressante est que ce sont deux modèles qui ont été très largement diffusés, répliqués et qui ont généré de nombreuses séquences dans les forums impliqués dans la réponse économique au Changement Climatique.

MARKAL est un modèle destiné à représenter les systèmes énergétiques, à tous les niveaux géographiques (monde, régions mondiales, pays, communautés territoriales....). Sa création résulte des efforts conjoints d'équipes du groupe de recherche sur le nucléaire de Julich (KFA) en Allemagne et du Brookhaven National Lab (BNL) aux USA. Les débuts de la conception du modèle MARKAL datent des années 70 et très vite ce modèle s'est développé sur le mode coopératif dans le cadre d'une association mondiale d'utilisateurs sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Energie (ETSAP). De nombreuses équipes sont venues s'ajouter aux créateurs initiaux et ont apporté des modifications au modèle initial, créé des interfaces, ajouté des versions (Groupe canadien GERAD de Richard Loulou, Manne à Stanford...). L'une des dernières sessions de l'Energy Modeling Forum (EMF) s'est déroulée en parallèle d'une session de travail de l'ETSAP organisation qui fédère les utilisateurs de MARKAL et lors de la session de l'EMF elle-même, sur 70 communications aux alentours d'une vingtaine étaient consacrées à des mises en œuvre de MARKAL (taux supérieur à 25% !). Au travers de MARKAL on aura l'exemple d'un développement coopératif de modèle (mais qui impose un droit d'entrée pour s'affilier au club d'utilisateurs « ETSAP »). MARKAL est un modèle d'ingénieur intéressant **les décisions de politiques publiques** relatives à l'énergie, plus qu'un travail de théorie économique.

DICE est un modèle réalisé par William Nordhaus, à l'Université de Yale. Il couronne une carrière débutée dans les années 70 et pratiquement consacrée à la modélisation autour du changement climatique. Contrairement à MARKAL, Nordhaus a immédiatement mis son modèle **dans le domaine public** sous la forme de versions tournant dans le logiciel GAMS, puis dans EXCEL (les programmes sont, par exemple, donnés dans le livre de Nordhaus et disponibles sur son site). Les résultats du travail sur le modèle ont fait l'objet de publications dans les revues scientifiques les plus prestigieuses (Science, American Economic Review, voir le site de la Cowles Foundation en biblio pour les télécharger...). Le modèle de Nordhaus est un modèle « paradigmatique », il a défini un style de modélisation relatif aux modèles intégrés qui a inspiré de nombreux chercheurs et suscité de nombreuses séquences et extensions.

Ces deux modèles **tracent un peu le cours futur de la modélisation dans le contexte nouveau des logiciels « open source »** (DICE ou MARKAL ne sont pas Open Source « à la lettre » mais en possèdent certains caractères). On peut sans risque d'erreur affirmer que dans le futur les seuls modèles qui seront crédibles, seront ceux **dont les sources seront publiques** et dont les résultats pourront être reproduits et vérifiés par de nombreuses équipes.

**2-Comment aborder les modèles DICE et MARKAL ?**

Lorsqu'il est question des modèles, on dispose de différentes catégories de matériels et de documents pour les évaluer :

- des publications scientifiques,
- des manuels de fonctionnement,
- des programmes informatiques....

Plus généralement, il se pose une question essentielle qui est de savoir comment des concepts préétablis, des questions de recherches sont transcrits en termes d'équations du modèles associées à des procédures et protocoles de résolution. Cette association est fondamentale, beaucoup de la substance des modèles en matière de connaissances provient de l'association de ces trois strates :

- systèmes d'équations,
- procédures de résolution,
- protocoles de résolution.

Les équations constituent le cœur du modèle. Une procédure de résolution est une méthode **générique** de résolution (simulation séquentielle ou optimisation intertemporelle). Enfin, les protocoles de résolution encadrent tous les détails qui permettent de préparer le calcul pour répondre à une question donnée. Aucune analyse des résultats d'un modèle ne peut faire l'économie d'une investigation détaillée à ces trois niveaux.

Les publications permettent de se faire des idées sur les questions de recherches et de juger de l'intérêt des résultats. Elles ne sont toutefois pas suffisantes pour s'assurer de la pertinence de la transcription des problèmes posés dans les termes du modèle.

Il faut donc en référer, pour analyser les choses plus avant, aux manuels de fonctionnement d'une part, aux programmes d'autre part et enfin autant qu'il est possible il est nécessaire de faire tourner les modèles pour contrôler leur fonctionnement, analyser leur sensibilité aux choix des paramètres....Et à ce niveau on va se trouver dans une situation qui reste relativement confuse. Il existe des modèles dont la complexité interdit le contrôle hors participation sur le long terme à l'équipe qui les a créés. C'est le cas du modèle IMAGE. Dans le cas de DICE et MARKAL la situation est meilleure. Les principes de MARKAL, au moins dans sa version « de base », sont assez simples pour appréhender son fonctionnement. DICE est suffisamment compact pour être reproduit et analysés dans un temps fini.

Toutefois dans les deux cas il reste de nombreuses zones d'ombre. Une grande partie de l'expérience contenue dans un modèle **continue de se transmettre comme un savoir faire artisanal**. La lecture des manuels de MARKAL et celle du livre sur DICE ne fournissent pas toutes les clés et peuvent souvent laisser perplexe. Nous essayerons de conclure sur ce qui pourrait-être fait pour rendre plus claire la question de l'interprétation des modèles.

### **3-Le modèle DICE**

#### ***3.1 Présentation « littéraire » du modèle DICE***

Le modèle DICE est un des paradigmes de modèle intégré

En pratique le cours des événements dans le prochain siècle dépendra de l'agencement de phénomènes qui sont détaillés et décryptés dans les trois volumes du rapport IPCC. Le problème est de savoir comment et à quel rythme tous ces phénomènes vont s'interpénétrer et s'influencer mutuellement de manière dynamique :

- L'état des milieux géophysiques (climat, régimes des courants marins...) dépendra des décisions économiques et de l'évolution technique relatives aux systèmes énergétiques par les biais des concentrations de gaz à effet de serre émises par les activités humaines ;
- Les processus économiques dépendront en retour à la fois de l'évolution climatique (par exemple dans l'agriculture) et de l'ampleur et du coût des mesures de prévention (réduction des émissions, adaptation ou réparations des dommages) ;
- Les grands écosystèmes terrestres et la biodiversité seront influencés et influenceront le climat ; de la nature des couverts végétaux et de la biologie marine dépendra la séquestration<sup>1</sup> ou la libération de CO<sub>2</sub> et de méthane par les écosystèmes.

Le modèle DICE se propose de rendre compte de l'interpénétration des phénomènes d'une manière condensée pour déterminer selon **quels profils temporels doivent se répartir les dépenses de réduction** des émissions compte tenu :

- du fonctionnement global de l'économie,
- des coûts de la réduction des émissions compte tenu de son intensité,
- des coûts des dommages du changement climatique compte tenu de la modification de l'état de la composition de la biosphère.

Le modèle DICE est un modèle qui décrit l'économie mondiale dans son interaction avec le système climatique représenté sous une forme simplifiée. Il est dérivé d'un type de modèle classique en économie, le modèle de croissance optimale (modèle de Ramsey). DICE est un modèle en temps discret dans lequel on définit à chaque période « T » deux grands groupes d'équations :

- les équations « intra périodiques » qui relient les variables contemporaines ;
- les équations inter périodiques qui sont de classiques équations d'évolutions.

La structure du système d'équations peut être sommairement résumée de la façon suivante (voir en annexe une formulation plus précise) :

#### *Les équations « intrapériodiques »*

- Définition de la production à partir du stock de capital mondial et de la population mondiale, cette production est pondérée par une fonction qui rend compte des **dommages** dus au changement climatique lesquels dépendent de la température moyenne du globe ; elle est pondérée également des **coûts des réductions** d'émissions de gaz à effet de serre réalisées à chaque période ; enfin un terme rend compte d'un progrès technique exogène ;
- Equilibre économique, la production à chaque période est égale à la consommation mondiale plus l'investissement ;
- Définition des émissions de CO<sub>2</sub> à partir de la production mondiale.

#### *Les équations interpériodiques*

---

<sup>1</sup> Le terme de « séquestration » recouvre plusieurs processus, la fixation de CO<sub>2</sub> par les végétaux dans le cadre de la photosynthèse d'une part, la captation physique du CO<sub>2</sub> après combustion de combustibles fossiles et son stockage ultérieur par injection dans des structure géophysiques, la possibilité d'utiliser des processus physico-chimiques artificiels pour capter le CO<sub>2</sub> atmosphérique.

- Evolution du stock de capital à partir du stock de capital et de l'investissement à la période précédente en tenant compte de la dépréciation du capital ;
- Evolution du stock de CO2 atmosphérique à partir du stock de CO2 et des émissions à la période précédente ;
- Evolution de la température à partir du stock de CO2 atmosphérique à l'année courante et de la température de l'année précédente (modèle de climat simplifié).

Les équations et fonctions « exogènes »

- Evolution de la population mondiale (exogène) ;
- Fonction définissant les coûts des réductions d'émissions à partir de leur niveau (par calage économétrique) ;
- Evolution du progrès technique, intensité en énergie et en carbone de la production (évaluation de type économétrique) ;
- Fonction de dommages liés à la température moyenne (évaluation de type économétrique).

Ce sont ces fonction « exogène » qui constituent la matière quantitative ou empirique du modèle sur le versant économique. Ces évaluations sont assez soignées chez Nordhaus et s'appuient sur des compilations d'études économique

Le système d'équations est « sous déterminé », c'est à dire que l'évolution du système dépend **de deux variables de contrôle** :

- La première variable de contrôle est classique aux modèles de croissance optimale, elle a trait au partage de la production entre la consommation et l'investissement ;
- La seconde variable de contrôle et ici la plus fondamentale est le **niveau de réduction des émissions** à chaque période

L'une des originalités introduite pas W. Nordhaus **a été de passer de la conception classique d'un modèle de simulation séquentiel (calculé dans un temps homothétique du temps réel) à un modèle de contrôle optimal**. Au lieu de devoir faire fonctionner la simulation à partir de scénarios exogènes définissant à chaque période les réductions d'émissions et la consommation mondiale, on va chercher à déterminer des valeurs optimales de ces variables par un calcul « **intertemporel** ». C'est à dire que l'on va écrire un système d'équations qui est constitué en déclinant les équations précédentes pour l'ensemble des périodes concernées depuis la période initiale jusqu'à l'horizon temporel final. On va résoudre globalement (comme un système d'équations simultanées) ce système d'équations en ajoutant des conditions initiales et si nécessaire des contraintes finales (portant par exemple sur la température finale, sa stabilisation.....) en **optimisant une fonction d'utilité sociale** qui est une somme actualisée d'une fonction de la consommation par tête.

Grâce à cette structure, DICE s'est affranchi des défauts qui avaient été diagnostiqués sur le modèle initial du Club de Rome. DICE est un modèle économique rigoureux conforme aux modèles de croissance optimale. Il incorpore du progrès technique et enfin il ne risque pas de manquer sa cible comme cela est classique pour les modèles de simulation (c'est

« l'overshoot and collapse » du modèle de Club de Rome). On peut en effet dans ce cadre inter-temporel fixer, si nécessaire, comme contraintes des conditions finales impliquant une stabilisation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre à un certain niveau.

L'un des objets du modèle de Nordhaus est également de déterminer une « taxe optimale » correspondant à divers profils de réduction des émissions (en fait une chronique de taxe). Sans rentrer dans des détail technique on peut voir cette taxe comme une sorte de « valeur duale » de l'effort de réduction. Il y a derrière cela des interprétation économique du modèle qui ne sont pas dénuées d'ambiguïté.

### **3.2-Présentation « semi formelle » du modèle DICE Le modèle DICE de Nordhaus : un modèle « top down »-« coût-bénéfice » intertemporel**

On présente ici, de manière très simplifiée, la structure du modèle DICE sans détailler les formes fonctionnelles. Ce modèle est un modèle exprimé en temps discret dans le cadre du logiciel GAMS. Ce logiciel crée un système d'équations par déclinaisons des équations suivantes pour toutes les périodes traitées et soumet cet ensemble d'équations (où toutes les périodes sont traitées « simultanément ») à un solveur dirigé par un critère d'optimisation . C'est ce principe qui fonde les résolutions intertemporelles. Pour une description détaillée voir :

<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dicemodels.htm>

#### **Equations intra-périodiques**

$Y(t)=\Omega(t)A(t)f[N(t),K(t)]$  Définition de la production  $Y(t)$  en fonction du stock de capital  $K(t)$  et de la main d'œuvre disponible  $N(t)$  avec des pondérations  $A(t)$  et  $\Omega(t)$  due respectivement au progrès technique, aux dommages et aux efforts de réduction

$Y(t)=C(t)+I(t)$  Equilibre économique, la production  $Y(t)$  se partage entre la consommation  $C(t)$  et l'investissement  $I(t)$

$E(t)=[1-\mu(t)]\sigma(t)Y(t)$  Définition des émissions  $E(t)$  à partir de la production  $Y(t)$ , des efforts de réductions  $\mu(t)$  et de l'intensité de  $Y(t)$  en émissions de carbone  $\sigma(t)$

$\Omega(t)=l[T(t),\mu(t)]$  Réductions de production dues aux dommages liés à l'augmentation de température  $T(t)$  et aux coûts de la réduction des émissions  $\mu(t)$

#### **Equations inter-périodiques d'évolutions**

$K(t)=(1-\delta)K(t-1)+I(t-1)$  Evolution du capital  $K(t)$  en fonction de sa dépréciation et de l'investissement  $I(t)$

$$M(t)=g[E(t-1),M(t-1)]$$

Evolution de la masse de carbone atmosphérique en fonction des émissions  $E(t)$  et de cette masse à la période précédente

$$T(t)=h[T(t-1),M(t)]$$

Evolution de la température en fonction de la masse de carbone atmosphérique et de l'état de la température à la période précédente ( modèle de climat simplifié)

### Variables de contrôles

$\mu(t)$  Taux de réduction des émissions dans l'économie

$C(t)$  Consommation des ménages

### Chroniques exogènes d'évolution du progrès technique et du facteur d'émission

$A(t)$  Progrès technique (exogène)

$\alpha(t)$  Intensité de la production en émissions (exogène)

$N(t)$  Evolution de la population (exogène)

### Critère d'optimisation intertemporel : somme actualisée d'une fonction de la consommation par tête et de la population

$$\max_{\{c(t)\}} \sum_t U[c(t), N(t)] * (1+\rho)^{-t}$$

## **4-Le modèle MARKAL**

### **4.1-Présentation « littéraire » de MARKAL**

Pour bien comprendre le modèle MARKAL, il faut se reporter au problème qu'il prétend traiter. Dans nos sociétés, particulièrement les sociétés industrielles, le « système énergétique » est constitué de l'association de nombreux équipements de production, transport et transformation d'énergies. Un ensemble de vecteurs énergétiques (fuel brut, pétrole, charbon, gaz, électricité....) circulent depuis les gisements primaires jusqu'à la production de services énergétiques finaux (chauffer, éclairer, transporter...). Entre les deux se tiennent les grands équipements énergétiques de valorisation et de transport des énergies primaires (raffineries, centrales électriques....).

Le nombre de sources primaires est important (charbon, gaz, pétrole, nucléaire, hydroélectrique, renouvelables....). Les sous systèmes qui produisent les services finaux sont également diversifiés (production de chaleur industrielle par l'électricité, la co-génération, transport de passager par automobiles individuelles ou transports collectifs, production de chaleur dans l'habitat par combustion de gaz ou utilisation de pompes à chaleur, lampes à incandescence ou basse consommation, habitats isolés et « solaire » ou mal isolés etc....)

L'objet de MARKAL est de traiter cette complexité pour proposer, par calcul, des organisations « cohérentes » du système énergétique dimensionnées par le spectre de la demande finale en services énergétiques (produire, se chauffer, se déplacer....). Cohérent

signifie ici que chaque maillon est convenablement dimensionné pour répondre à une certaine charge en limitant les capacités inutilisées.

En pratique MARKAL se fonde sur un catalogue de technologies (de production d'énergie primaire, de transformations en vecteurs utilisables par les productions des services finaux, de dispositifs ou systèmes produisant les services énergétiques finaux...). Chaque technologie est définie quantitativement par l'équipement spécifique qu'elle mobilise et par les entrées et sorties du processus de transformation énergétique qu'elle met en oeuvre en fonctionnement. Un algorithme (de programmation linéaire) permet de dimensionner ces processus les uns par rapports aux autres pour satisfaire à des **demandes de services énergétiques données**. C'est la satisfaction de ces demandes, au moindre coût et sous contraintes environnementales, qui constitue la base du problème à résoudre.

Mais le système énergétique (mondial, d'un pays, d'une région...) se transforme sans cesse sous l'influence de l'évolution économique. Par exemple dans le contexte des pays en croissance démo-économique (PVD, USA...) ou confrontés à des obsolescences (Russie, Europe...) la structure du système énergétique se transforme en permanence sous la quadruple influence :

- Du progrès technologique,
- De l'ampleur et de la structure des demande finales ( qui dépendent des évolutions de la démographie et de l'économie),
- Des contraintes environnementales.

MARKAL s'est donc presque immédiatement développé **en un modèle dynamique** pour explorer l'évolution des structures du système énergétique au fur et à mesure des transformations de la société. Il faut cependant insister immédiatement sur le fait que le modèle MARKAL est un modèle qui s'efforce surtout de mettre en évidence la cohérence des structures techniques, dans un cadre d'optimisation sous contraintes (d'investissement, contraintes environnementales...). A il faut souligner l'absence, au moins dans les premières versions de MARKAL, de trois questions pourtant fondamentales :

- Les liens entre le système énergétique et l'ensemble macro-économique dans lequel il est inclus,
- La question de l'apparition d'innovation en fonction des efforts de R&D ;
- Les comportements d'adoption des innovations en fonction de déterminants économiques, sociologiques voir même dans certains cas anthropologiques.

Bien que des tentatives de représenter les comportements, le lien au reste des processus économiques ait été tenté dans les dernières versions de MARKAL, celui-ci reste considéré comme un modèle « pauvre » en comportements. Ces dernières années MARKAL s'est cependant beaucoup diversifié et en particulier ont été développées :

- des versions liées à la macro-économie,
- des versions représentant le progrès technique,
- des version représentant certains comportements d'adoption;
- des version liant l'état du système énergétique aux dommages potentiels du changement climatique.



Au total MARKAL se diversifie de plus en plus et s'avance sur le terrain des modèles intégrés. Il passe progressivement d'une approche « bottom-up » à un modèle incorporant des liens aux processus macro-économiques et évolue également du statut de modèle « coûts-efficacité » au statut de modèle « coûts-bénéfices ».

#### **4.2-MARKAL, présentation « semi formelle »**

Markal est fondé sur trois nomenclatures indicées :

- « j » nomenclature des processus de transformation des énergies (« energy technologies »)
- « i » nomenclature des vecteurs énergétiques, des biens et services énergétiques (« energy forms »)
- « t » nomenclature des périodes temporelle

**Les principales variables** sont :

**Act (j,t)** niveau de fonctionnement du processus « j » à la période « t »

**Cap(j,t)** niveau de l'équipement relatif au processus « j » à la période « t »

**Inv (j,t)** niveau de l'investissement dans l'équipement afférent au processus « j » à la période « t »

**Imp (i,t)** niveau des importations du bien ou service énergétique « i » à la période « t »

**Exp (i,t)** niveau des importations du bien ou service énergétique « i » à la période « t »

**Les principaux paramètres** sont :

##### *Paramètres technologiques*

**A(i,j)** qui sont les input (si négatif) et les output (si positif) du fonctionnement du processus « j » pour le service ou bien énergétique « i » pour une unité du processus en fonctionnement. Par exemple les inputs et output pour une centrale thermique de 500Mw d'un type donné.

##### *Paramètres de scénarios*

**D(i,t)** qui représente la demande finale dans le bien ou service énergétique « i » à la période « t ». Selon les cas cette demande finale peut être spécifiée en énergie finale (électricité, fuel, gaz...) pour des industries définies ou le secteur résidentiel. Cependant on tend de plus en plus à spécifier la demande en terme de « services énergétiques finaux » ce qui autorise des degrés de liberté plus importants essentiel pour les études de « maîtrise de la demande d'énergie ». Ainsi le service « transport de personne » peut être fourni par des véhicules individuels ou un système de transport en commun.

##### *Paramètres de conditions initiales*

**Act (j,0), Cap(j,0), Inv (j,0), Imp (i,0), Exp (i,0)**

En pratique les conditions initiales décrivent le fonctionnement du système au temps origine.



**Les principales équations sont:**

Equations « intrapériodiques » d'équilibre physique des productions et consommations

Pour chaque bien énergétique « i » le bilan des productions et consommations par l'ensemble des processus « j » plus les importations, moins les exportations doit satisfaire à la demande finale en ce bien à chaque période.

$$\sum_j \text{Act}(j,t) \times A(i,j) + \text{Imp}(i,t) - \text{Exp}(i,t) - D(i,t) \geq 0$$

Equation intrapériodique de compatibilité entre le niveau de fonctionnement du processus « j » et la capacité installée :

$$\text{Act}(j,t) \leq \text{Cap}(j,t)$$

Equations d'évolution

$$\text{Cap}(j,t+1) = \text{Cap}(j,t) + \text{Inv}(j,t) \dots \{ -\text{Dem}(j,t) + \sum_{j'} [\text{Trf}(j',j) - \text{Trf}(j,j')] \}$$

Si l'on suppose que l'on peut avoir des démantèlements ou des transformations du capital ou capacité du processus « j » en « j' » du type amélioration du rendement d'une centrale électrique, isolation des logements.....

On définit une fonction objectif des différentes variables (Cap (j,t), Act (j,t), Imp (i,t), Exp (i,t)) et des contraintes environnementales sous la forme d'un coût total actualisé qui comprend :

- Les coûts « technologiques » d'amortissement, de fonctionnement et de maintenance des activités de transformation énergétiques ;
- Les coûts et revenus liées aux importations et exportation d'énergie ;
- Des taxes sur les émissions polluantes.

C'est cette fonction objectif que l'on cherchera à minimiser dans le calcul dans une optique « coûts-efficacité »

Le modèle est résolu de façon intertemporelle en ayant fourni :

- Des chroniques de demande de services énergétiques (liées à l'évolution de l'économie et de la démographie) ;
- Des capacités initiales relatives aux différents équipements énergétiques ;
- Des contraintes d'émissions portant sur des paniers de gaz à effet de serre.

Le résultat obtenu est une chronique des constructions, démantèlements et transformations des capacités installées des différents équipements énergétiques.

**4.3-Problèmes pratiques de mise en œuvre de MARKAL**

Dans sa version « de base » Markal repose sur les principes relativement sûr et simple de la programmation linéaire dynamique. C'est cette simplicité qui est d'ailleurs à l'origine de son succès et de ses nombreuses déclinaisons. La plupart des pays qui se sont approprié MARKAL se sont contentées de décliner les modèles précédemment réalisés et en particulier

d'adapter les bases de données à leur propre contexte. Ceci est possible dans la mesure où les données technologiques varient peu d'un pays à l'autre (une centrale thermique est toujours une centrale thermique). La relative universalité des composant élémentaires du modèle, les technologies est ici à l'origine de ses possibilités de duplication.

### 5-Questions générales relatives au partage et à la compréhension des modèles

Le texte qui précède s'efforce d'être clair possible la présentation de deux modèles qui se sont trouvés au centre de la discussion des politiques climatiques. Il n'est pas du tout certain qu'il soit aussi clair qu'il le faudrait. Le lecteur intéressé pourra se reporter aux sites Internet, nombreux, qui traitent de ces deux modèles ; il pourra ainsi se faire une opinion. Il faut souligner que dans le cas de DICE et MARKAL le mérite des auteurs de ces modèles est d'avoir assuré une reproductibilité des résultats et une circulation des sources qui n'est pas si fréquente. Le développement quasiment en « open source » pour DICE et sous forme coopérative pour MARKAL fixent une sorte de direction pour l'activité scientifique autour des modèles dans les années à venir.

Le temps où les modèles étaient jugés sur leurs résultats est révolu. Aujourd'hui on ne saurait faire confiance à un modèle dont la structure, la procédure de résolution, le mode opératoire n'est pas accessible. On peut se demander si par exemple le modèle IMAGE n'est pas appelé à pâtir de son opacité.

Mais l'ouverture n'est pas tout. Les modèles constituent « un langage de négociation » selon une phrase devenue assez courante. Mais qui dit langage pose la question de la manière dont se crée de la vérité, du possible et de l'impossible, du sens, de la signification, du raisonnement....En la matière tout ceci s'articule dans un modèle n'est en rien clair. Plus personne ne semble croire en des modèles « essentialistes » ou « réalistes », autrement dit des modèles qui représenteraient la réalité « sans reste », des modèles qui donnerait accès au réel « dans sa totalité », qui constitueraient une « mise à disposition de la réalité ».

Les modèles ne sont plus qu'une pièce de raisonnement qui enrichit les raisonnements antérieurs. Ces modèles disent à la fois plus (parce qu'ils organisent une complexité supérieure) que le langage empêtré dans sa linéarité discursive et de ce fait incapable de rendre compte d'interactions particulièrement enchevêtrées. Mais les modèles disent également « moins » que le langage naturel qui nous permet constamment d'ouvrir la perspective par de nouveaux arguments, ou de traiter les questions sous différents angles.

De toute façon on ne saurait construire un modèle sans utiliser le langage, nous commençons par donner des noms aux variables voire aux équations et aux contraintes. On ne saurait non plus interpréter un modèle et analyser ses résultats sans le langage. Mais les ponts, les intermédiaires entre les équations et les discours sur le réel (des noms des variables à l'interprétation des résultats) restent relativement obscurs. La lecture des descriptions de DICE et MARKAL auxquels les lecteurs pourront se reporter devrait les en convaincre.

Dans l'époque qui vient, il nous reste à rendre plus systématique et plus transparent les intentions de signification, à rendre aussi plus claire les interprétations des résultats des modèles. A ce titre, la question, peut-être pas d'une norme, mais **de principes minimums de présentation des modèles** reste posée. De tels principes peuvent t'il être énoncés ? C'est une des question auxquelles notre réunion pourrait tenter de répondre. Les langues sont analysés en terme de syntaxe et de sémantique. Quel sens pourraient avoir ces termes pour analyser des modèles ?

Par exemple une distinction nette entre les différentes catégories d'équations et de contraintes s'impose (soumis à discussion) :

- Contraintes « intrapériodiques » ou équations d'état,
- Contraintes « interpériodiques » ou équations d'évolution,
- Conditions initiales,
- Contraintes et conditions finales,
- Définitions de variables de « contrôle »,
- Procédures de résolution (analytique ou algorithmique , résolution séquentielle, intertemporelle...)
- Protocoles de résolution (fixation de contraintes « ad hoc » pour faire tourner, paramètres circonstanciels adapté à la résolution d'un problème spécifique)
- Justification des paramètres et du niveau d'agrégation,
- Etudes de sensibilité.

Au delà de ces catégorisations, la question de l'interprétation du modèle (structure, résultats...) se pose. Avant de rentrer dans l'analyse des modèles eux même, on peu souligner plusieurs directions d'analyse (soumis à discussion):

- Les modèles traitent à la fois d'objets et de processus, comment ce dédoublement est-il pris en compte ?
- Comment s'articulent les « intentions de représenter » (qui sont caractérisées par le fait que l'on **attribue des noms** aux variables) avec la production de sens ou de signification dans le modèle (c'est le fait que les variables sont prises dans des équations qui leur attribue une signification)
- De ce fait syntaxe et sémantique ne sont-ils pas liés de manière beaucoup plus rigide dans les modèles que dans le langage ?
- Comment les méthodes de résolution et les protocole de résolution viennent-ils ajouter du sens « en plus » aux systèmes d'équations ?

### **Bibliographie Internet**

#### **DICE**

<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/>

Page personnelle de W. Nordhaus (modèle climat et autres travaux)

<http://cowles.econ.yale.edu/> Site de la Cowles Foundation, les publications de Nordhaus dans les grandes revues scientifiques peuvent y être téléchargées.

#### **MARKAL**

[http://www.ecn.nl/unit\\_bs/etsap/main.html](http://www.ecn.nl/unit_bs/etsap/main.html)

Page de l'ETSAP qui fédère les utilisateur de MARKAL

<http://www.gerad.ca/~amit/emg/>

Site de l'Energy Modeling Group un des groupes les plus actif sur MARKAL

<http://www.gams.com>

Site de GAMS langage de programmation utilisé par Nordhaus, MERGE et MARKAL

[http://ecolu-info.unige.ch/~nccrwp4/Ppt-Labriet\\_21nov.pdf](http://ecolu-info.unige.ch/~nccrwp4/Ppt-Labriet_21nov.pdf)

[http://ecolu-info.unige.ch/~nccrwp4/May2\\_Labriet.pdf](http://ecolu-info.unige.ch/~nccrwp4/May2_Labriet.pdf)

Deux exposé d'un Markal avec dommages qui contiennent une très bonne description de markal

<http://www4.ncsu.edu/~frey/CoehloFreyEnergyMixAWMA.pdf> Markal Brésil

[http://eem.web.psi.ch/Publications/Dissertations/Barreto\\_thesis.pdf](http://eem.web.psi.ch/Publications/Dissertations/Barreto_thesis.pdf) Thèse en ligne de Barreto sur le technological learning dans les modèles types MARKAL (295 pages)

<http://www.pnl.gov/aisu/pubs/smeken19.pdf> Markal environnement pour villes chinoises  
[www.vg2.nl/does2003/Smekens.ppt](http://www.vg2.nl/does2003/Smekens.ppt) Excellente présentation d'un Markal avec technical learning et prospective à 2100